第34卷　第14期 计　算　机　工　程 2008年7月
Vol.34　No.14 Computer Engineering July 2008
·网络与通信·　文章编号：1000—3428(2008)14—0135—03　文献标识码：A　中图分类号：TP301.6

基于博弈均衡的 WDM 光网络动态恢复策略

张　颖，朱　娜
(江苏大学计算机科学与通信工程学院，镇江 212013)

摘　要：提出一种基于博弈论和 D*思想的动态均衡启发式算法，求解波分复用(WDM)光网络中波长级恢复问题。算法将网络中的各边代价与当前波长使用情况综合考虑，运用博弈论原理动态构建估计函数，实现了 WDM 光网络的高效恢复。仿真结果表明，该算法能有效地降低光路阻塞，提高恢复率，其快速和智能特性能够满足恢复时间的要求。

关键词：波分复用光网络；路由和波长分配；博弈论；D*算法；动态恢复

Game Balance Based Dynamic Restoration Strategy for WDM Optical Networks

ZHANG Ying, ZHU Na
(School of Computer Science and Telecommunications Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

【**Abstract**】A dynamic balanced heuristic algorithm based on game theory and D* principle is proposed to resolve restoration problem in wavelength level for WDM optical networks. On the basis of considerations of the cost of each edge and the use of wavelength comprehensively, through dynamic constructing the evaluation function with using game theory, the algorithm achieves efficient restoration in WDM optical networks. The simulation results show that this algorithm can effectively reduce the blocking rates, promote the restoration rates. In addition, its rapid and intelligent performances can greatly adapt to requirements of restoration time.

【**Key words**】WDM optical networks; Routing and Wavelength Assignment(RWA); game theory; D* algorithm; dynamic restoration

1　概述

光网络的恢复，是指当业务发生故障时，按一定的优化算法，依据网络现有空余资源选择一条合适的替代路由。为避免对当前业务造成太大影响，其恢复速度一般要求在几百毫秒至几秒之内[1]。

对于波长级的恢复，通常使用动态Routing and Wavelength Assignment(RWA)算法来实现。在动态RWA问题中，阻塞率是衡量分配策略优劣的重要指标。研究的目的是尽量减少所使用的波长数并降低阻塞率。由于RWA问题是NP完备问题，文献[2]中提出了分层图模型，将RWA问题转化为纯路由问题求解。此方法使网络模型扩大了|W|倍，增加了计算时间，因此不宜在大规模网络环境下使用。也有研究者使用遗传算法等仿生算法求解RWA问题[3]，但此类算法收敛速度慢，很难满足动态环境下对恢复时间的要求。

2　相关基本理论

2.1　混合策略博弈

在博弈中，一旦每个参与者竭力猜测其他参与者的战略选择，这时参与者的最优行为是不确定的，引入混合策略博弈可以解决此博弈解的不确定性[4]。相关定义如下：

(1)博弈标准式：用$G=\{S_1,S_2,\cdots,S_n;\ u_1,u_2,\cdots,u_n\}$表示$n$人博弈的标准式。其中，$S_1,S_2,\cdots,S_n$为参与者的战略空间，$u_1,u_2,\cdots,u_n$为收益函数。

(2)混合策略：对标准式博弈$G=\{S_1,S_2,\cdots,S_n;\ u_1,u_2,\cdots,u_n\}$，假设$S_i=\{s_{i1},s_{i2},\cdots,s_{iK}\}$。那么，参与者$i$的一个混合策略概率分布$p_i=(p_{i1},\ p_{i2},\cdots,p_{iK})$。其中对所有$k=1,2,\cdots,K$，$0\leqslant p_{ik}\leqslant 1$，且$p_{i1}+p_{i2}+\cdots+p_{iK}==1$。

(3)混合策略纳什均衡：一个混合策略组合$p^*=(p_1^*,p_2^*,\cdots,p_n^*)$是$G=\{S_1,S_2,\cdots,S_n;\ u_1,u2,\cdots,u_n\}$的一个纳什均衡，则对每一个参与者$i$=1,2,⋯,$n$，以及所有的$p_i\in P_i$，不等式$v_i(p_i^*,p_{-i})\geqslant v_i(p_i,p_{-i})$都成立。其中，$v_i$为期望收益函数。

2.2　D*算法基本原理

D*算法即动态的A*算法(dynamic A-star algorithm)，是一种动态环境下的启发式搜索算法，应用于环境仅为部分已知或不断变化的状态空间搜索中，与其他进化式启发算法相比，具有实现相对简单、收敛速度快等优点。最早由卡内基梅隆机器人中心的Stentz提出[5]，用于美国火星探测器寻路。该算法根据当前环境状况动态建立估价函数，沿着最有启发性的节点搜索最佳路径。弥补了A*算法必须事先知道全部环境信息的缺点，且具有与A*算法一样的高效特征。

D*算法主要思想如下：

(1)初始化，根据现有已知环境信息求得最短路径。

(2)沿最短路径移动，若下一节点状态无变化，则直接按最短路径向后追溯。否则按下列 A*算法更新路径。

1)将当前节点设为扩展节点。

2)为扩展节点的后继节点 n 设立估价函数 $\hat{f}(n)$，以确定下一个要扩展的节点。

基金项目：江苏省自然科学基金资助项目(04KJB520027)
作者简介：张　颖(1977－)，男，工程师、硕士研究生，主研方向：光网络的优化和管理；朱　娜(通信作者)，教授
收稿日期：2007-08-30　**E-mail：**hyaying@163.com

$$\hat{f}(n)=\hat{g}(n)+\hat{h}(n) \tag{1}$$

其中，$\hat{f}(n)$ 为从开始节点经过节点 n 到达目标节点的最小路径的估计值；$\hat{g}(n)$ 为从开始节点到节点 n 的一个最小代价路径的代价；$\hat{h}(n)$ 为节点 n 和目标节点之间估计的最小代价。

3)下一个要扩展的节点 n 是 $\hat{f}(n)$ 最小的节点，当此节点是目标节点时过程终止，由目标节点回溯即得到最优路径，否则返回步骤 1)。

其中，$\hat{h}(n)$ 的约束条件是：对于网络中所有节点n，$\hat{h}(n)\le h(n)$，且 $\hat{h}(n)\ge 0$。可以证明[6]，当 $\hat{h}(n)$ 满足上述条件时，此算法收敛于到达目标的一条最小代价路径，$\hat{h}(n)$ 越接近 $h(n)$，算法的收敛速度越快，当 $\hat{h}(n)$=0 时，A*算法退化为Dijkstra算法。

3 基于博弈论的动态均衡恢复策略

3.1 估价函数的设置

由以上分析可知，D*算法的难点在于估价函数 $\hat{f}(n)$ 的设置，尤其是 $\hat{h}(n)$ 值的估价。本文提出了一种结合网络中各边代价与波长使用情况，利用博弈论原理来确定估价函数的方法。为与边代价相区别，重新定义后的代价称为全代价(full_cost)。

3.2 算法数学模型

假设网络物理拓扑为无向图 $G(N,E,W)$。给定一个从开始节点 s 到目的节点 d 的连接请求。其中 $s, d \in N$。算法的目的就是通过动态权衡当前网络的波长使用情况和边代价，找出最合适的恢复路由。在全局维护 2 个列表：(1)OPEN 列表：存放本次搜索中待扩展的节点。(2)CLOSED 列表：存放本次搜索中已扩展的节点。

OPEN和CLOSED列表中存放的每个节点包含以下 信息：(1)节点号n；(2)该节点的 $\hat{f}$ 值；(3)该节点的 $\hat{g}$ 值；(4)s~n的最小全代价路径上的波长使用情况WL_n；(5)最小全代价路径上该节点的父节点号。

设开始节点为 s，目标节点为 d，当前节点为 c，其后继节点为 n，定义如下：

$$\hat{g}(n)=\begin{cases} g(c)+b\cdot p_n\cdot UsedWL_n+(1-p_n)\cdot cost_{(c,n)} & n\ne s \\ 0 & n=s \end{cases}$$

$$\hat{h}(n)=\begin{cases} b\cdot p_n\cdot UsedWL_n\cdot hop_n+(1-p_n)\cdot shortestPC_n & n\ne d \\ 0 & n=d \end{cases}$$

$$\hat{f}(n)=\hat{g}(n)+\hat{h}(n)=b\cdot(\sum_{i=2}^{k}(p_i\cdot(UsedWL_i+UsedWL_n\cdot hop_n))+ \\ (\sum_{i=1}^{k-1}((1-p_i)(cost_{(s_i,s_{i+1})}+shortestPC_n)) \tag{2}$$

等式的前一项为波长影响因子，后一项为代价影响因子。其中，$UsedWL_n$为WL_n中已使用的波长数；$cost_{(c,n)}$为边(c,n)上的边代价；hop_n为节点n至目标节点d的最短路径上的跳数；$shortestPC_n$为节点n至目标节点d的最短路径上的边代价；b为波长数与边代价之间的平衡因数；p_n为当前网络状态下选择边(c,n)时的波长权重($0\leqslant p_n\leqslant 1$)。

多次仿真实验表明，当 b 取值为连接平均代价与波长数的比值的 2 倍时可以取得较好的效果。

对于p_n的值，利用混合策略博弈理论进行分析。假设某节点度为 2，分别有边e_1,e_2，设$min(c_i)$为选择边e_i时估计的最小代价，$min(w_i)$为选择边e_i时已用波长数。笔者给出了如图 1 所示的博弈矩阵。该矩阵形的现实意义是当路由选择只考虑波长使用率时，其收益为最小边代价；当只考虑最小边代价时，其收益为最小已用波长数。因此，e_1和e_2的期望收益E_1,E_2分别为

$$\begin{cases} E_1=p_1\cdot p_2\cdot\min(c_1)+(1-p_1)(1-p_2)\cdot\min(w_1) \\ E_2=p_2\cdot p_1\cdot\min(c_2)+(1-p_2)(1-p_1)\cdot\min(w_2) \end{cases}$$

在E_1,E_2中分别对p_1,p_2求偏导，得：

$$\begin{cases} p_2\cdot\min(c_1)-(1-p_2)\cdot\min(w_1)=0 \\ p_1\cdot\min(c_2)-(1-p_1)\cdot\min(w_2)=0 \end{cases} \tag{3}$$

由式(3)可以解得纳什均衡时的波长权重p_1,p_2。由此推广到度为n的节点。选择边j的期望收益为

$$E_j=\prod_{i=1}^{n}(p_i)\cdot\min(c_j)+\prod_{i=1}^{n}(1-p_i)\cdot\min(w_j)$$

其对于p_j的偏导方程为

$$\prod_{i=1,i\ne j}^{n}(p_i)\cdot\min(c_j)-\prod_{i=1,i\ne j}^{n}(1-p_i)\cdot\min(w_j)=0 \tag{4}$$

对于边 1,2,⋯,n，解此n元n次非线性方程组，即可得到各边的波长权重$p_1,p_2,\cdots,p_n$。

		e_1 波长	e_1 代价
e_2	代价	$\min(c_1)$, $\min(c_2)$	Null, Null
e_2	波长	Null, Null	$\min(w_1)$, $\min(w_2)$

图 1 波长-代价博弈矩阵

3.3 算法描述

根据上述理论与分析，设计了基于博弈均衡的 WDM 网动态恢复策略的算法，其流程如图 2 所示。

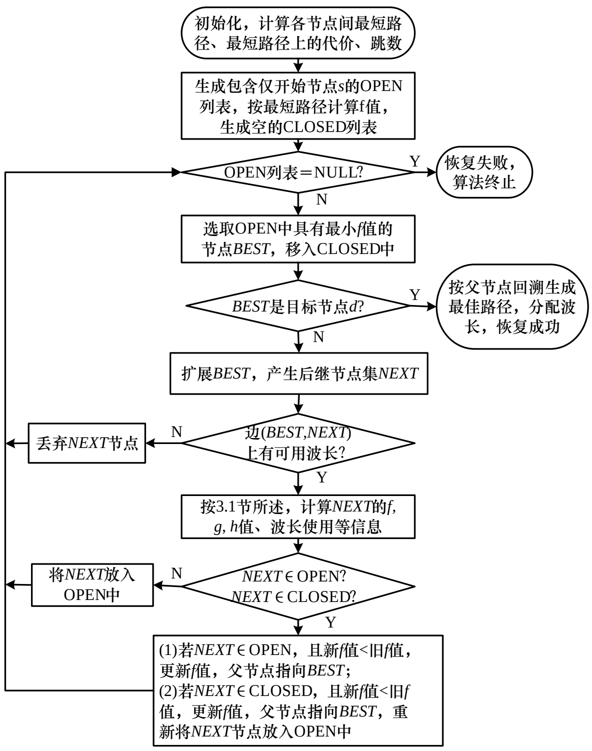

图 2 算法流程

3.4 算法性能分析与优化

设网络节点数为 n，边数为 E。本算法中，除各节点自身维护的数据外，全局中仅用到 2 个列表：OPEN 和 CLOSED，且其最大长度不超过网络结点数 n。因此，算法的空间复杂度为 $O(n)$，具有良好的空间性能。

在最坏情况下，算法中每次扩展均不按预先估价的最短路径行进，启发式算法失效，等效于 Dijkstra 算法，若排序采用堆排序算法，其时间复杂度为 $O(E)\cdot O(n\mathrm{lb}n)=O(E\cdot n\mathrm{lb}n)$。

即使在最坏情况下，算法也拥有良好的时间性能。并且，由于在各节点计算估价函数时，只需用到与该节点邻接的各边信息，因此算法适用于分布式网络环境，并能够降低网络通信开销。

算法中，博弈非线性方程组的求解方法对性能影响较大，本文采用牛顿迭代法求解，此法为超线性收敛。此外，当网络节点数 n 较大时，OPEN 和 CLOSED 列表的排序也是算法的主要时间开销，因此，本文采用性能更好的二叉堆(binary heap)排序方法。

4　仿真结果与分析

仿真平台采用 C#和 Matlab 混合编程方法实现。主程序用 C#开发，而求解波长权重的非线性方程组和仿真数据分析用 Matlab 编写，生成 COM 组件后通过 C#调用。

仿真网络拓扑如图 3 所示，为星型与环型的混合结构，边代价在图中给出，波长数$|W|=32$，平衡因数 b 取经验值为 1.5。分别仿真了无波长转换功能和中心交换节点($n\geqslant 12$)有波长转换功能 2 种情况。

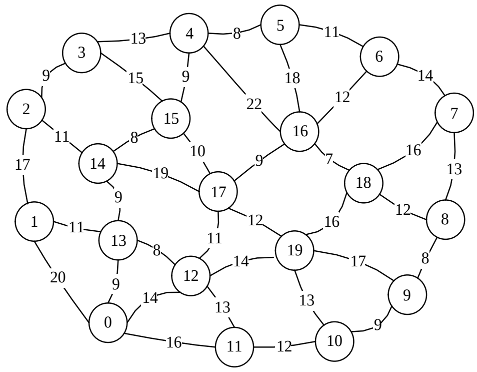

图 3　仿真网络拓扑结构

仿真时假设连接请求按先后次序随机到达网络，请求一旦被拒绝，则立即丢弃(即产生阻塞)。用此算法仿真 RWA，计算阻塞率，并与固定最短路径法和可变最短路径法进行比较，其中的可变最短路径算法也采用 D*算法编写，当最短路由分配失败时则选择另一条可用次短路由，不考虑波长使用情况的影响。各种算法的阻塞率经多次仿真后取平均值，列于图 4 中。

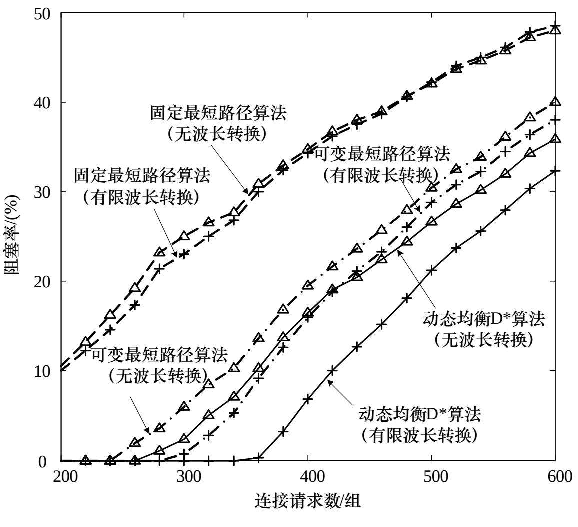

图 4　各种算法在不同连接请求下的阻塞率

低负载时，波长利用率较低，估价函数中的波长权重较小，算法基本沿最短路径寻路，其性能与最短路径法相当。随着负载的增加，波长利用率上升，最短路径中较难得到连续波长，最短路径法开始产生较高阻塞，而估价函数中的波长权重也相应增加，算法可通过选择一条全代价最低的迂回路由解决此问题，因此阻塞情况较低。仿真显示，当中心节点具有波长转换功能时，最短路由算法由于最短路径上链路使用率较高，性能并未有较大改善，而本算法则拥有更好的性能，阻塞率明显降低。

图 5 显示了各种算法在不同连接数时的恢复率。从中可以看出，本算法在连接数较多时仍然拥有较高的恢复率。但是与最短路径算法恢复率呈线性缓慢下降不同，一旦连接数超过一定限度，算法的恢复性能迅速恶化，原因是由于算法的智能特性，负载较重时迂回路由占用了相对较多的链路，使得网络链路使用率升高，从而造成恢复时可用链路减少。

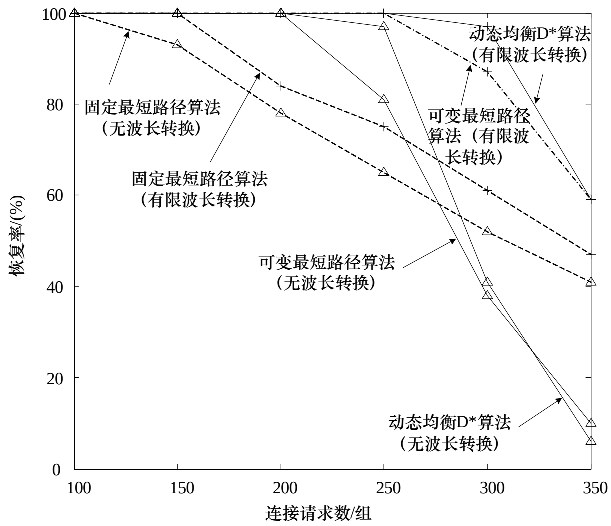

图 5　各种算法不同连接数时的恢复率

另外，从图 4 和图 5 中也可以看出，该算法由于引入了波长权重的概念，在波长使用情况与路径代价间寻求均衡，比仅考虑代价的可变最短路径算法拥有更高的性能，可以取得更低的阻塞率和更高的恢复率。

恢复时间是考察算法优劣的另一重要指标。仿真显示，平均每条业务恢复时间小于 20 ms，算法的时间性能可以很好地满足实际需求。

5　结束语

综上所述，本文提出的基于博弈论的动态均衡 D*算法能够优化光网络的资源配置，较好地解决 WDM 网故障恢复问题，提高网络故障环境下的生存性。其实现相对简单、收敛速度快、网络通信开销低，且适用于分布式环境。

参考文献

[1] ITU-T G.8080-2003. Architecture for the Automatically Switched Optical Network(ASON) Amendment 1[S]. 2003.

[2] Chen Chien, Banerjee S. A New Model for Optimal Routing and Wavelength Assignment in Wavelength Division Multiplexed Optical Networks[C]//Proc. of the 15th Annual Joint Conference of the IEEE Computer Societies. San Francisco, USA: [s. n.], 1996: 164-171.

[3] 王　清, 欧阳伟, 曹文君. WDM 全光网络中优化组播路由的遗传算法[J]. 计算机工程, 2006, 32(18): 103-105.

(下转第 142 页)